

## تحلیل فضایی لندفرم‌های بادی با استفاده از نظریه فرکتالی (مطالعه موردی: ریگ اردستان)

سیاوش شایان\* - استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس  
مهران مقصودی - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران  
موسی گل‌علیزاده - استادیار، گروه آمار، دانشکده آمار و ریاضیات، دانشگاه تربیت مدرس  
محمد شریفی کیا - دانشیار، گروه سنجش از دور، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس  
سیده فاطمه نوربخش - دانشجوی دکتری جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۰

### چکیده

هندسه فرکتالی یکی از روش‌های آماری است که سعی دارد پیچیدگی‌های طبیعت را در قالب ریاضیات و آمار مطرح سازد. هدف این مطالعه تحلیل فرکتالی لندفرم‌های بادی ریگ اردستان است. بدین منظور از تصاویر ماهواره کارت‌نوست سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ با قدرت تفکیک ۳ متر استفاده شد. به منظور تحلیل فرکتالی، چهار لندفرم بادی شاخص شامل تپه‌های ماسه‌ای طولی، تپه‌های ماسه‌ای عرضی، برخان و برخان‌های تاغ‌کاری شده در منطقه‌ای با وسعت ۱۳۵۰ کیلومترمربع تفکیک شد. برای تعیین بعد فرکتالی از روش شمارش خانه استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی هندسی لندفرم‌ها خاصیت فرکتالی دارد. تحلیل بعد فراکتالی نشان داد که بیشترین میزان بعد فرکتالی متعلق به لندفرم‌های بادی تثبیت شده است که بیشترین وسعت را در منطقه دارد. پس مساحت لندفرم‌ها در بعد فرکتالی آن‌ها متأثر است. همچنین، عدم تغییرات این بعد طی مدت بررسی، نشان‌دهنده تثبیت این لندفرم‌ها و عدم تغییر آن‌ها طی این مدت بررسی است. بیشترین میزان تغییرات مربوط به تپه‌های ماسه‌ای عرضی و طولی است که گستره آن‌ها رو به کاهش است. این امر با کاهش بعد فرکتالی نشان داده شد و تطبیق می‌کند. به طور کلی، نتایج به دست آمده از تحلیل فراکتالی به طور نسبی واقعیت‌های مورفولوژیکی لندفرم‌های بادی را تحلیل می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ریگ اردستان، لندفرم‌های بادی، لندفرم‌های ژئومورفولوژی، نظریه فرکتالی.

### مقدمه

اکنون دانشمندان جهان را مجموعه‌ای از سیستم‌های پیچیده‌ای می‌دانند که پیش‌بینی پیامدهای آن‌ها دشوار است. در این شرایط سیستم‌ها به شیوه‌ای دورانی عمل می‌کنند که در آن بی‌نظمی منجر به نظم و نظم موجب بی‌نظمی می‌شود. امروزه، دیگر تصور ساده از نحوه فعالیت جهان جای خود را به تصویری پیچیده و پارادوکس‌گونه داده است؛ بدان معنا که

وضعیت ظاهری آن‌ها گویای نظم یا بی‌نظمی آن‌ها نیست. پیچیدگی جهان در تضاد با سادگی قوانین فیزیکی قرار دارد. امروزه، رفتارهای غیرخطی و پویای سیستم‌ها به طور وسیع مطالعه شده است؛ یعنی، رفتارهایی که منجر به پیچیدگی و در نهایت آشوب<sup>۱</sup> می‌شود. مطالعه این رفتارها، منجر به وضع قوانین جدیدی در طبیعت نمی‌شود، ولی باعث شده تا بتوانیم قوانین موجود را عمیق‌تر درک کنیم. یکی از نکات جالب توجه در پیچیدگی این است که به‌رغم تصورات پیشین، قوانین ساده به بروز رفتارهای بسیار پیچیده می‌انجامد. از همین روست که اندازه‌گیری پیچیدگی و راه‌های کاهش آن در سیستم‌ها و فرایندهای تصمیم‌گیری در مواجهه با آن‌ها به یکی از مباحث روز تبدیل شده است.

باید تأکید داشت که امروزه ریاضیات ابزار قدرت‌مندی است در اختیار طبیعی‌دانان برای توصیف فرایندها و پیچیدگی‌های موجود در طبیعت تا بتوانند این ناآرامی‌ها را در قالب ریاضی و روابط کمی درآورند و تا حدی آثار آن‌ها را پیش‌بینی کنند. بدین منظور و برای تبیین این پیچیدگی‌ها امروزه استفاده از هندسه فرکتال<sup>۲</sup> و بعد فرکتالی اشکال و اجسام در شناخت غیریکنواختی موجود در محیط‌های طبیعی رایج شده است (کوتلو و همکاران، ۲۰۰۸).

مندلبروت، ریاضیدان انگلیسی، در سال ۱۹۶۷ مشاهده کرد که با تغییر مقیاس اندازه‌گیری، طول سواحل انگلستان تغییر می‌یابد، به طوری که با کوچک‌تر شدن مقیاس طول اندازه‌گیری شده ساحل افزایش می‌یابد و با توجه به نامحدود بودن مقیاس اندازه‌گیری و با توجه به اینکه می‌توان واحد اندازه‌گیری شده را بسیار کوچک‌تر در نظر گرفت، در نهایت طول ساحل به بی‌نهایت یا به میزانی بسیار زیاد افزایش می‌یابد. نظریه وی به تحول شگرفی منجر شد و علمی به نام هندسه فرکتال پایه‌گذاری شد. از آن به بعد محققان به منظور توصیف خودتشابهی در پدیده‌ای فیزیکی یا شیمیایی از پارامتری به نام بعد فرکتالی استفاده می‌کنند. بعد فراکتال، جریان موجود در عناصر طبیعی را تعیین و قابل اندازه‌گیری می‌کند. یکی از معروف‌ترین مثال‌ها برای فهم موضوع منحنی کخ و خط طبیعی ساحل (دریاها یا رودخانه‌ها) است. این خطوط با توجه به فراوانی جزئیاتشان بیش از خطوط یک‌بعدی و کمتر از سطوح دوبعدی است. پس بعد فراکتال آن‌ها بیش از ۱ و کمتر از ۲ است و بعد فراکتال منحنی کخ ۱٫۲۶ است.

فرکتال عبارت است از شیئی یا شکلی دارای سه ویژگی:

۱. در مقیاس میکروسکوپی بسیار پیچیده باشد.
۲. دارای خصوصیات خودمتشابهی باشد؛ یعنی، از فرایند تکرار به‌وجود آید.
۳. بعد آن صحیح نباشد.

برای بیان چنین اشکالی به هندسه‌ای جدا از هندسه اقلیدوسی به نام هندسه فرکتال نیاز است. اگر بعضی خصوصیات آماری پدیده‌ای مثل بارش با تغییر مقیاس تغییر نکند گفته می‌شود پدیده مورد نظر از نظر مقیاسی تغییرناپذیر یا از نظر مقیاسی ساده است که به این حالت مونوفرکتال گفته می‌شود. اگر شکل یا شیء مورد نظر دارای خصوصیت عدم تغییرپذیری باشد، تنها با یک بعد قابل توصیف است، ولی اگر پیچیدگی با یک بعد قابل توصیف نباشد، باید از چند بعد استفاده کرد که به این حالت چندمقیاسی یا مالتی‌فرکتال گفته می‌شود.

دیدگاه فرکتال سعی دارد با به‌کارگیری قواعد ساده تغییرات مقیاس به شبیه‌سازی رفتار پیچیده سیستم‌ها بپردازد. فرکتال یا رفتار فرکتالی در واقع رفتاری است که در طبیعت و هر چیزی وجود دارد که متمایل به داشتن حالت تعادلی است. طبیعت اگرچه به ذات خود هوشمند نیست، اما تغییرات خارجی که بر طبیعت اعمال می‌شود آن را به سمتی سوق می‌دهد که تغییر خارجی مذکور را خنثی می‌کند. به عبارت دیگر، چرخه اکوسیستم خودش را اصلاح می‌کند. به همین دلیل یکی از معانی‌ای که برای رفتار فرکتالی قائل می‌شوند، تغییر رفتار برای رسیدن به تعادل کلی است. لذا، با توجه به نظریه موضوع و مسائل مطرح‌شده باید بتوان رفتار لندفرم‌های ژئومورفیکی را از دیدگاه فرکتال بررسی کرد.

در این میان سیستم‌های ژئومورفیکی سیستم‌های بازی است دارای فرایندها یا متغیرهای درونی و بیرونی که از طریق پراکنش انرژی (انرژی خورشیدی، بالآمدگی زمین‌ساختی و بارش) در حالت موازنه و تعادل قرار می‌گیرد (نشائی، ۱۳۸۸:۳۷). از آنجا که لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی دارای اشکال اندازه و ابعاد خاصی است، نحوه آرایش فضایی این اشکال نسبت به یکدیگر تعیین‌کننده بسیاری از فاکتورهای مؤثر و یکسان در شکل‌گیری آنهاست که با دقت در آنها شاید بتوان فاکتورهای مؤثر را شناسایی کرد. بنابراین، عامل ایجابی یا عاملیت پژوهش حاضر رفتار مورفولوژیکی است که هر یک از اشکال ژئومورفیکی بادی در محیط دارد. هندسه فرکتالی بر آن است با استفاده از نظریه‌ها و فرمول‌های خود بتواند رفتار پیچیده لندفرم‌ها را در قالب ریاضیات و کمیت مطرح سازد.

در رابطه با پیچیدگی می‌توان به تلاش‌های اولین نظریه‌پردازان، هنری پوانکاره<sup>۱</sup>، ادوارد لورنز<sup>۲</sup> و بنوا مندلیبروت<sup>۳</sup> اشاره کرد. پس از آن، این نظریه در حیطه تمام علوم وارد شد. هاگت (۱۹۸۸) کاربرد این نظریه را در ژئومورفولوژی بیان کرد. آشوب در جغرافیای طبیعی را مالانسون و همکاران (۱۹۹۰) بررسی کردند. رودریگوئز-ایتارب و رینالدو (۱۹۹۷) مسئله فرکتال (برخال) و خودسازماندهی در حوضه‌های رودخانه‌ای را بررسی کردند. زاهونی و همکاران (۱۹۹۸) نظریه فرکتال را برای توپوگرافی سطح استفاده کردند. دیدا (۲۰۰۰) به مقایسه سری زمانی مشاهداتی بارش و سری زمانی شبیه‌سازی شده با فرکتال پرداخت. باس (۲۰۰۲) آشوب، فرکتال و خودتنظیمی را در ژئومورفولوژی ساحلی مطالعه کرد. فونستاند و مارکوس (۲۰۰۳) خودسازماندهی در سیستم‌های ساحلی رودخانه‌ای را مطالعه کردند. دونالد و تورکات (۲۰۰۷) سیستم‌های پیچیده خودتنظیم را در ژئومورفولوژی مطالعه کرد. پلیر (۲۰۰۷) رفتار فرکتالی در لندفرم‌های جریان را مطالعه کرد. پرادپ (۲۰۰۸) ابعاد فرکتالی ژئومورفولوژی را در شمال هند مطالعه کرد. شن و همکاران (۲۰۱۵) ویژگی‌های فرکتالی رودخانه زرد را در ارتباط با تحولات تکتونیکی منطقه‌ای مطالعه کردند. لیسو و همکاران (۲۰۱۲) ویژگی‌های فرکتالی لندفرم‌ها را در منطقه‌ای از چین مطالعه کردند. پاپانیکولا و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نظریه فرکتال به تعیین کمیت مورفولوژی میکروفرم‌های خوشه‌ای پرداخت.

در ایران رامشت (۱۳۸۱) برای اولین بار به مفهوم تعادل در دیدگاه فلسفی ژئومورفولوژی پرداخت. سپس، در سال ۱۳۸۲ به بررسی نظریه آشوب در ژئومورفولوژی پرداخت. جعفری (۱۳۸۷) در کتاب خود به تحلیل هندسی مثلث خیام

1. Henri Poincare  
2. Edward Lorenz  
3. Benoit Mandelbrot

پرداخت و ابعاد فرکتالی را توصیف و توجیه کرد. کرم (۱۳۸۹) در مقاله خود نظریات آشوب، فرکتال و سیستم‌های غیرخطی را تبیین کرد. نیشابوری و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی ارتباط بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات با برخی خصوصیات فیزیکی خاک پرداختند. نوری قیداری (۱۳۹۱) به استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی بارش با استفاده از نظریه فرکتال پرداخت. سایمون (۱۳۹۲) در کتاب منظر، الگوی فرکتالی را به‌طور کامل و در فضایی غیراقلیدوسی تشریح کرد. پل (۱۳۹۳) در کتاب بنیان علمی، درباره فرکتال‌ها و مرگ آن‌ها بحث کرده است. با جمع‌بندی کلی پیشینه معلوم شد که رفتار فرکتالی در مورد لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی به‌طور دقیق بررسی نشده است تا بتوان رفتار غیرخطی لندفرم‌های دارای پیچیدگی بسیار را توصیف کرد. با این حال، اندک مطالعاتی برای کمی‌کردن خصوصیات فیزیکی لندفرم‌ها صورت گرفته است.

این مقاله سعی دارد تا رفتار موفولوژیکی لندفرم‌ها را با استفاده از هندسه فرکتالی تبیین کند و از هندسه و ریاضیات جهت تغییرسنجی استفاده شده است. بنابراین، بر لندفرم‌های بادی تمرکز شده است که تغییرپذیری به نسبت سریع‌تری نسبت به دیگر لندفرم‌ها دارد تا شاید بتوان به نتایج دقیق‌تری در بازه زمانی کوتاه‌تر رسید. تحلیل فضایی لندفرم‌های بادی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی پژوهشگران حوضه ژئومورفولوژی است. همچنین، ارزیابی ابعاد به لحاظ فرکتالی شدن از دیگر اهداف این مطالعه است.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت طبیعی منطقه

منطقه مورد مطالعه بین عرض جغرافیایی ۳۰ ۳۳ تا ۴۵ ۳۳ شمالی و طول جغرافیایی ۱۵ ۵۲ تا ۵۳ شرقی قرار دارد. از نظر تقسیمات کشوری در شهر زواره- اردستان و جزء استان اصفهان است. ارتفاع منطقه از جنوب غربی به شمال ۱۴۱۰ تا ۹۱۰ و به‌طور متوسط شیب آن ۰/۵ درصد است.

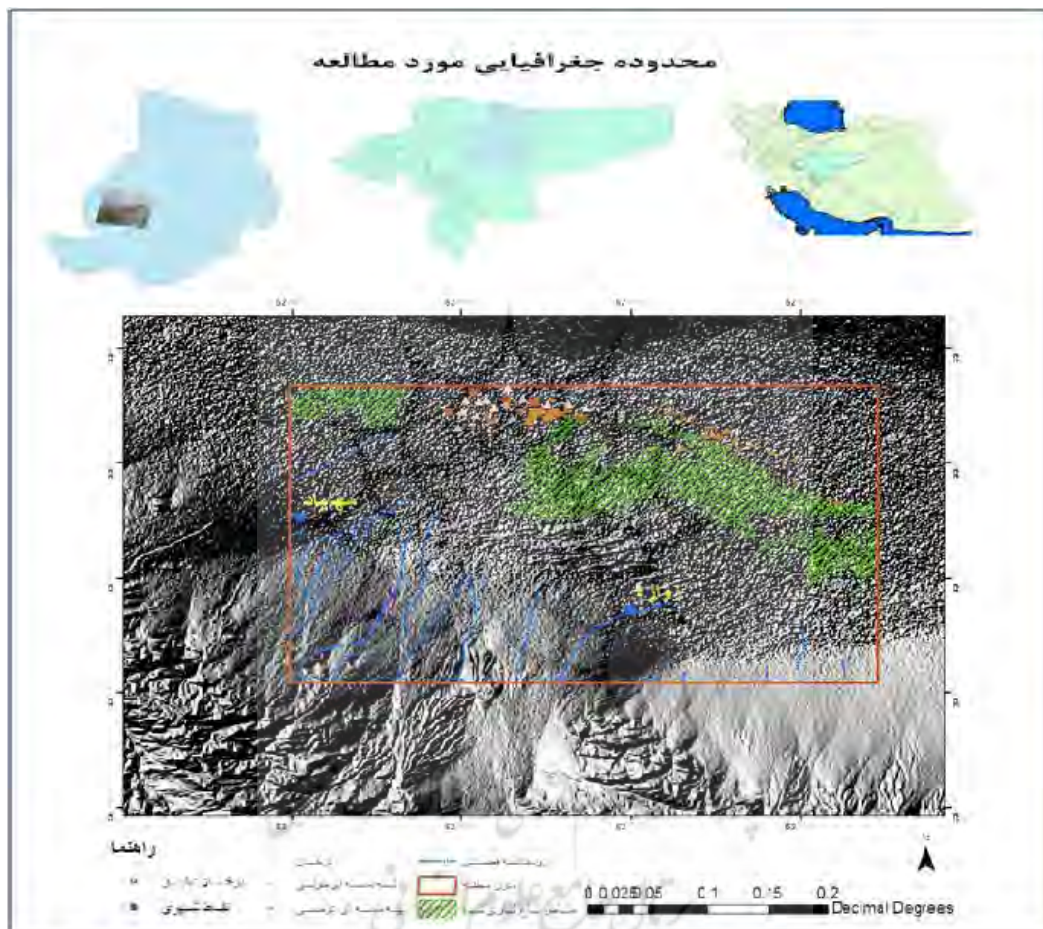
وسعت منطقه در حدود ۱۳۵۰ کیلومتر مربع است. محدوده جنوبی منطقه شهرستان زواره است. منطقه مورد مطالعه در جنوب کویر نمک و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال شرق مرکز استان اصفهان قرار دارد. قابل اشاره است که پوشش گیاهی این ناحیه از گونه استپ بیابانی است.

معدل حداقل درجه حرارت سالیانه برابر ۱۴/۱۰ درجه سانتی‌گراد و معدل حداکثر درجه حرارت سالیانه برابر ۶/۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

متوسط بارندگی سالیانه این شهرستان طی دوره یازده ساله ۱۱۷/۵ میلی‌متر گزارش شده است. حداقل نم نسبی در تیر ماه ۳/۲۴ درصد است. مجموع روزهای یخبندان به‌طور متوسط سالیانه ۵۵ روز و بیشترین روزهای یخبندان در دی و بهمن گزارش شده است. معدل درجه حرارت سالیانه این شهرستان ۵۴/۱۷ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه سال دی و گرم‌ترین آن تیر گزارش شده است.

ایستگاه اردستان دارای متوسط سالانه سرعت باد بین ۶ تا ۸ گره (۳ تا ۴ متر بر ثانیه) است. میانگین سالانه این ایستگاه بالای ۶ گره است. به لحاظ زمین‌شناسی، این منطقه در زون ساختاری ایران مرکزی و در حاشیه کویر و جنوب

فرونشست دق سرخ جای گرفته است. ساختارهای تبخیری رسی و نمکی از مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی موجود در منطقه است. همچنین، برجستگی‌هایی در قالب تپه شاهد در حوضه در حال فرونشست برجای مانده که آغاز پیدایش آن‌ها به گمان از اولیگوسن و در بعضی نواحی در اواخر ائوسن بوده است. به لحاظ ژئومورفولوژیکی، عمده‌ترین زیرواحدهای تشکیل‌دهندهٔ این گروه دشت‌های آبرفتی و دارای توپوگرافی مسطح و شیب ملایمی به سوی مرکز دشت است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

## داده‌ها و روش تحقیق

در پژوهش حاضر سعی شده است تا چهار لندفرم بادی شاخص شناسایی و محدودهٔ گسترش آن‌ها به دقت استخراج شود. بدین منظور اطلاعات مورد استفاده عبارت است از:

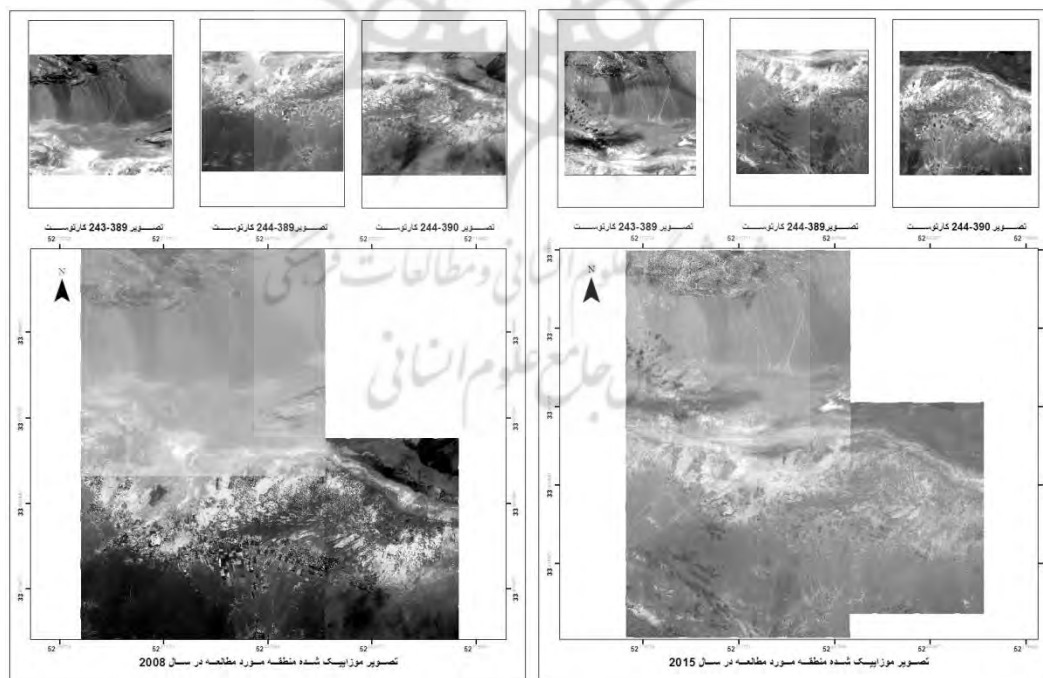
- تصاویر CARTOSAT1 ۲۰۰۸
  - تصاویر CARTOSAT1 ۲۰۱۵
  - نقشهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه، از سازمان زمین‌شناسی برای تهیهٔ نقشهٔ ژئومورفولوژی.
- شایان ذکر است که مدت هشت سال بررسی تغییرات زمانی بسیار کوتاه است اما به دلیل نبود تصاویر با قدرت تفکیک بالا به همین دو تصویر بسنده شد تا بتوان حداقل به لحاظ روش‌شناسی نتایجی تا حد امکان با دقت بالا را

به دست آورد. بدیهی است هر چه تصاویر در دست بررسی بیشتر باشد یا مدت زمان مطالعه طولانی‌تر شود، به مراتب به نتایج و تحلیل‌های گسترده‌تری می‌توان دست یافت.

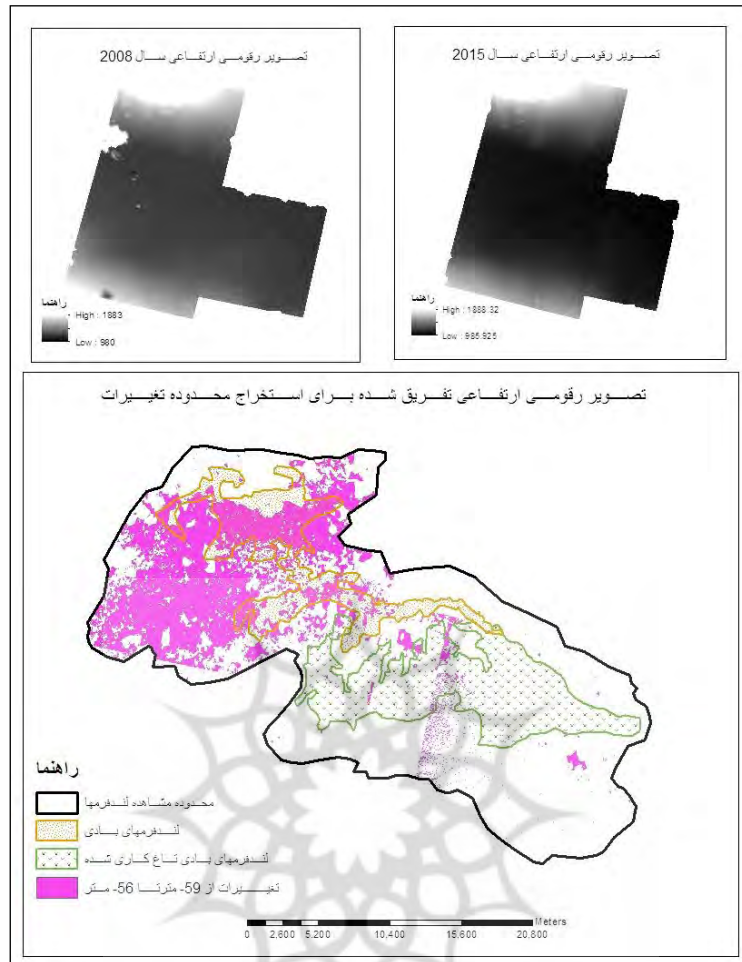
روش تحقیق حاضر، تلفیقی از مرور روش‌مند منابع کتابخانه‌ای و مطالعات میدانی است. در جریان بررسی کتابخانه‌ای و جستجوی اینترنتی، مقالات تحقیقی مرتبط در مجلات و سایت‌های پژوهشی داخلی و خارجی در زمینه هندسه فرکتالی گردآوری شد. در روش مطالعات میدانی، جمع‌آوری اطلاعات از طریق مشاهده مستقیم و مشاهده غیرمستقیم (تصاویر ماهواره‌ای) انجام شده است. به منظور افزایش دقت برای استخراج محدوده گسترش لندفرم‌های بادی لازم بود تا از تصاویر موجود، مدل رقومی ارتفاعی یا DEM با قدرت تفکیک ۲/۵ متر استخراج شود تا با سه‌بعدی‌سازی تصاویر بتوان بهترین تشخیص و شناسایی را انجام داد. این کار با استفاده از نرم‌افزار Erdas و روش نزدیک‌ترین همسایه در دو تصویر عقب و جلو انجام شد. بیش از هفتاد نقطه در این روش مشخص و در نهایت DEM منطقه استخراج شد. شایان ذکر است که تصاویر کارتوست زمین مرجع است و نیازی به آماده‌سازی‌های اولیه تصویر نبود.

DEM‌های استخراج‌شده و متعلق به سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ روی هم گذاشته شد تا قسمت‌های دارای تغییرات طی

این سه سال استخراج شود (شکل ۳).



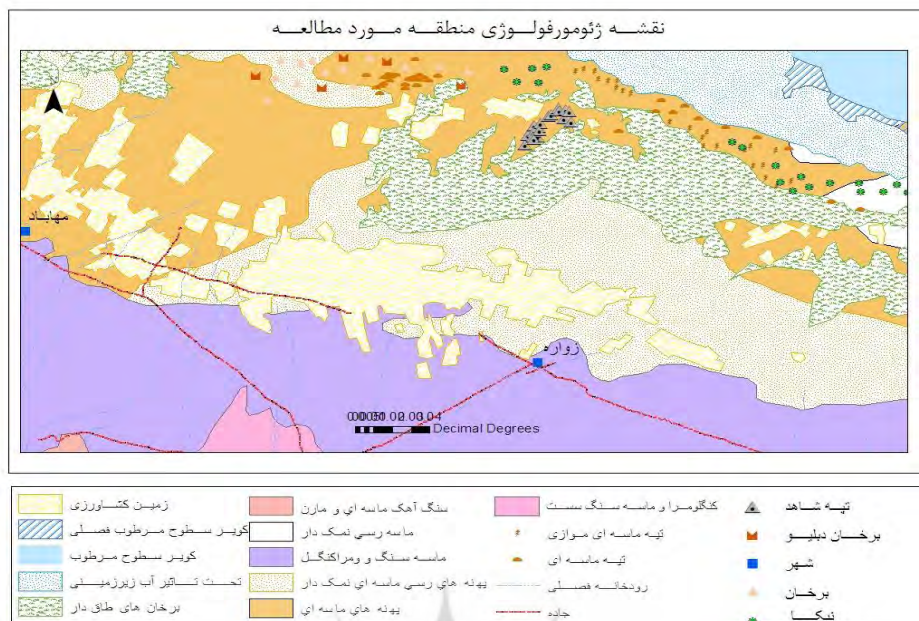
شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای کارتوست



شکل ۳. محدودهٔ تغییرات مستخرج از DEM2008 و DEM2015

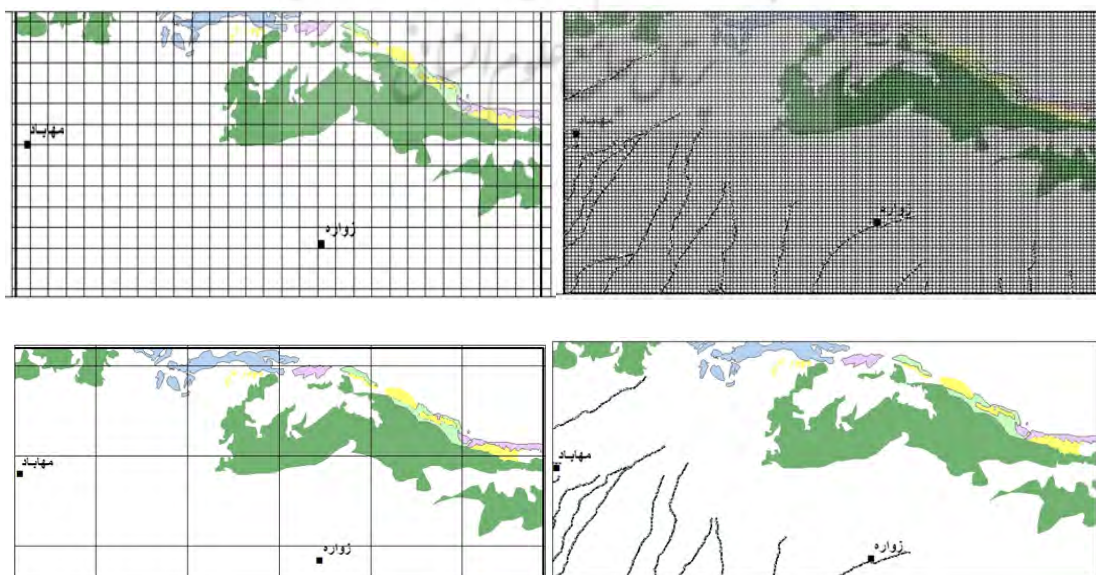
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود قسمت‌های تثبیت‌شده با تاغ طی این مدت تغییراتی نداشته است و تاغ‌کاری‌های انجام‌شده مانع حرکت برخان‌ها و تغییرات آن‌ها شده است و لندفرم‌های بادی متحرک کاملاً منطبق با محدوده تغییرات است.

در ادامه جهت تدقیق و شناسایی تمامی لندفرم‌ها، مطالعهٔ میدانی شد تا در شناسایی آن‌ها از روی تصویر اشتباهی پیش نیامده باشد. در نهایت، نقشهٔ ژئومورفولوژی منطقه تهیه شد (شکل ۴) و بر اساس آن محدودهٔ گسترش چهار لندفرم بادی شامل تپه‌های ماسه‌ای طولی، تپه‌های ماسه‌ای عرضی، برخان و برخان‌های پوشیده از تاغ شناسایی و به دقت تعیین شد.



شکل ۴. نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

برای مطالعه بعد فرکتال روش‌های متعددی وجود دارد. دو روش تقسیم‌بندی پله‌ای و شمارش خانه در مطالعات ژئومورفولوژیکی قابل پیاده‌سازی است. روش تقسیم‌بندی بر اساس مبنای محاسباتی متعلق به عوارض خطی است، زیرا اساساً روش تقسیم‌بندی با استفاده از ایجاد منحنی روی خط و تقسیم‌بندی آن است. بنابراین، شاید برای مطالعه عوارض خطی مانند رودخانه مناسب باشد. بر اساس روش شمارش خانه، شبکه‌ای از خانه‌های مربع‌شکل روی تصویر مورد نظر قرار داده می‌شود. اندازه شبکه با  $s$  مشخص می‌شود که معیاری از مقیاس است. تعداد خانه‌هایی که بخشی از تصویر را در خود دارد شمارش و حاصل این شمارش  $N(s)$  تعداد خانه‌ها خواهد بود. این روند با تغییر  $s$  به شبکه‌های ریزتر و شمارش تعداد خانه‌های در بردارنده تصویر  $N(s)$  تکرار می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵. نحوه محاسبه بعد لندفرم‌ها به روش بعد شمارش خانه با تغییر مقیاس



مرحلهٔ بعد ترسیم  $\text{Log } N(s)$  در مقابل  $\text{Log}(1/s)$  است. شیب خط مستقیم که به بهترین وجه اطلاعات را به نمایش می‌گذارد تقریباً برابر بعد شمارش خانه (Db) است. بعد فرکتال از طریق رابطهٔ (۱) حاصل می‌شود (استوان، ۱۹۹۴: ۴۰۹).

$$D = \frac{\text{Log} [N(s)]}{\text{Log} (\frac{1}{s})} \quad (1)$$

شیب خط بعد شمارش خانه (Db) از رابطهٔ (۲) به دست می‌آید.

$$D_b = \frac{[\text{Log} (N(s_2)) - \text{Log} (N(s_1))]}{\left[ \text{log} (\frac{1}{s_2}) - \text{Log} (\frac{1}{s_1}) \right]} \quad (2)$$

پس برای محاسبهٔ بعد فرکتال لازم است نمودار غیرخطی بعد فرکتال رسم شود. در این نمودار محور X اندازهٔ شبکه و محور Y نشان‌دهندهٔ نقاط موجود در هر پنجره است. سپس، این نمودار رسم شده با منحنی نظریهٔ فرکتال برازش داده می‌شود تا همبستگی بین دو نمودار محاسبه شود. طی این کار، شاخص  $a$  که خلاصه‌ای از انواع انحرافات شکل مورد نظر از قانون فرکتال است محاسبه می‌شود. این شاخص باید تقریباً برابر با ۱ باشد. حال اگر شاخص  $a$  بیش از ۴ یا کمتر از ۰/۱ باشد، شکل مورد نظر خاصیت فرکتالی ندارد (فرانکس، ۲۰۰۴: ۸۵؛ توماس و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۶. نمودار غیرخطی جهت محاسبهٔ شاخص‌های فرکتالی لندفرم‌های ریگ اردستان. منحنی تجربی به رنگ آبی و منحنی محاسبه‌شده به قرمز است.









میزان انطباق منحنی تخمین‌زده شده با منحنی واقعی با پارامتر C محاسبه می‌شود. هرچه این پارامتر کمتر باشد، بدان معناست که شکل مورد نظر خاصیت فرکتالی ندارد یا فرافرکتالی است. شایان ذکر است در این پژوهش تمامی محاسبات با نرم‌افزار Fractalyse انجام شده است.

## یافته‌های پژوهش

براساس مطالعات صورت گرفته در منطقه محدود گسترش پنج لندفرم بادی شاخص استخراج شد که عبارت بود از برخان‌ها، تپه‌های ماسه‌ای طولی، تپه‌های ماسه‌ای عرضی و قسمت‌هایی از ریگ که با تاغ‌کاری‌های متراکم روی برخان‌ها و تپه‌های ماسه‌ای به شدت تثبیت شده بود. هر چهار شکل در دو تصویر cartosat ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ شناسایی و استخراج شد تا به تفکیک مورد تحلیل فراکتالی قرارگیرد (جدول ۱).

پس از استخراج تصاویر، برای محاسبه پارامترهای فرکتالی لازم است تا تعداد مربع‌های حاوی لندفرم‌ها با تغییر ابعاد مربع‌ها بررسی شود. نتایج شمارش خانه‌های صورت گرفته روی لندفرم‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱. لندفرم‌های استخراج شده از روی تصاویر Cartosat

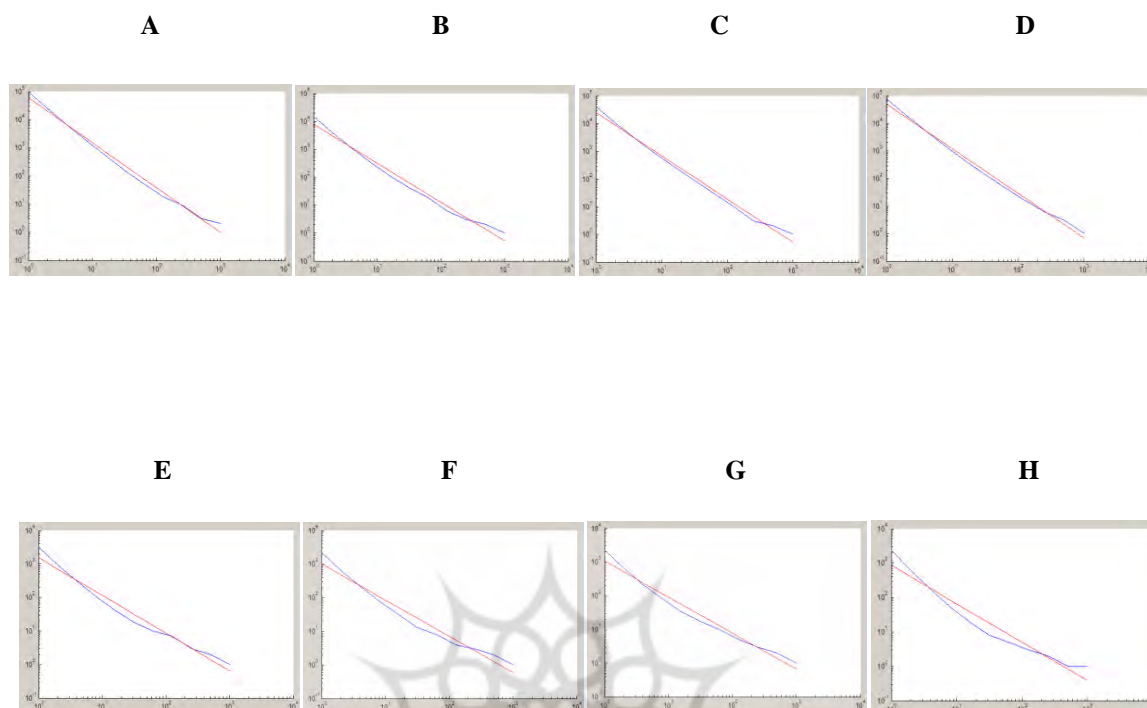
| لندفرم‌های بادی           | ۲۰۰۸  | ۲۰۱۵   |
|---------------------------|---|--|
| تپه‌ماسه‌ای عرضی          |    |    |
| مساحت                     | ۱,۳۵۶Km <sup>2</sup>  | ۰,۹۷۶Km <sup>2</sup>   |
| برخان                     |  |  |
| مساحت                     | ۱۷,۵۴۶Km <sup>2</sup>   | ۶,۵۹۲Km <sup>2</sup>   |
| تپه‌ماسه‌ای طولی          |  |  |
| مساحت                     | ۱,۰۵Km <sup>2</sup>   | ۰,۹۶۹Km <sup>2</sup>   |
| لندفرم‌های بادی تثبیت شده |  |  |
| مساحت                     | ۷۸,۰۴۱Km <sup>2</sup>   | ۷۸,۳۶۵Km <sup>2</sup>  |

جدول ۲. تغییر S و مقدار N در هر بازه برای محاسبه مؤلفه‌های فرکتالی لندفرم‌های بادی

| S    | ۲۰۰۸  |                     |                         |                     | ۲۰۱۵  |                     |                         |                     |
|------|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|
|      | برخان | تپه‌ماسه‌ای<br>طولی | لندفرم‌های<br>تثبیت‌شده | تپه‌ماسه‌ای<br>عرضی | برخان | تپه‌ماسه‌ای<br>طولی | لندفرم‌های<br>تثبیت‌شده | تپه‌ماسه‌ای<br>عرضی |
| 1    | ۳۹۹۴۱ | ۳۱۵۴                | ۷۸۷۳۲                   | ۲۳۶۱                | ۱۴۹۳۹ | ۲۲۱۱                | ۹۹۵۰۶                   | ۲۲۳۰                |
| 2    | ۱۰۵۰۹ | ۹۴۳                 | ۲۰۲۹۳                   | ۶۳۲                 | ۳۹۹۳  | ۶۶۰                 | ۲۵۵۵۰                   | ۶۷۴                 |
| 4    | ۲۸۷۶  | ۳۰۸                 | ۵۳۶۴                    | ۱۷۶                 | ۱۱۲۲  | ۲۲۱                 | ۶۷۱۹                    | ۲۱۹                 |
| 8    | ۸۳۴   | ۱۰۹                 | ۱۴۸۷                    | ۵۴                  | ۳۴۱   | ۸۰                  | ۱۸۴۲                    | ۸۴                  |
| 16   | ۲۷۳   | ۴۱                  | ۴۴۲                     | ۱۹                  | ۱۱۲   | ۳۲                  | ۵۳۴                     | ۳۴                  |
| 32   | ۹۱    | ۱۸                  | ۱۳۹                     | ۸                   | ۴۲    | ۱۳                  | ۱۶۱                     | ۱۷                  |
| 64   | ۳۰    | ۱۰                  | ۴۷                      | ۵                   | ۱۸    | ۸                   | ۵۳                      | ۱۰                  |
| 128  | ۱۰    | ۷                   | ۱۶                      | ۳                   | ۶     | ۴                   | ۱۸                      | ۵                   |
| 256  | ۳     | ۳                   | ۶                       | ۲                   | ۳     | ۳                   | ۹                       | ۳                   |
| 512  | ۲     | ۲                   | ۳                       | ۱                   | ۲     | ۲                   | ۳                       | ۲                   |
| 1024 | ۱     | ۱                   | ۱                       | ۱                   | ۱     | ۱                   | ۱                       | ۱                   |

باید توجه داشت که تعداد مربع‌های شمارش شده در دو سال موجود دلیل محکمی برای نشان دادن تغییرات فرکتالی نیست و لازم است دیگر مؤلفه‌های فرکتالی نیز محاسبه شود. اما قبل از بررسی بعد فرکتال، لازم است تا فرکتال بودن لندفرم‌ها به دقت بررسی شود. این عمل با مؤلفه‌های فرکتالی  $a$  و  $c$  امکان پذیر است. همان‌طور که قبلاً عنوان شد اولی میزان انحرافات منحنی لگاریتمی از منحنی تجربی و  $c$  میزان برازش منحنی لگاریتمی با منحنی تجربی است. بدین منظور نمودارهای لگاریتمی لندفرم‌های بادی ترسیم شد.

نتیجه محاسبات مؤلفه‌های فرکتالی در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس پارامتر  $a$  تمامی بازه‌ها در سال‌های مورد بررسی خاصیت فراکتالی دارد. اگرچه خاصیت فراکتالی کاملاً تیبیک همچون منحنی کخ را ندارد، ولی به‌منظور بررسی ویژگی‌های بازه مورد نظر به وسیله هندسه فراکتال کاملاً عملی است.



شکل ۷. نمودارهای لگاریتمی لندفرم‌های بادی (A) لندفرم‌های بادی تثبیت‌شده ۲۰۰۸؛ (B) لندفرم‌های بادی تثبیت‌شده ۲۰۱۵؛ (C) برخان ۲۰۰۸؛ (D) برخان ۲۰۱۵؛ (E) تپه‌های ماسه‌ای طولی ۲۰۰۸؛ (F) تپه‌های ماسه‌ای طولی ۲۰۱۵؛ (G) تپه‌های ماسه‌ای عرضی ۲۰۰۸؛ (H) تپه‌های ماسه‌ای عرضی ۲۰۱۵

شایان ذکر است که دقت محاسبات فوق با ضریب همبستگی R کنترل شد. در این تحقیق وقتی R بیش از ۰/۹۹۹ بود، نتایج برای محاسبات فراکتالی قابل قبول بود. بررسی میزان انحراف (مؤلفه c) منحنی نظری و واقعی هم نشان می‌دهد که میزان انحراف در حد بسیار کم و بی‌تأثیر است (جدول ۳).

بررسی بعد فرکتال نشان داد که بالاترین بعد فرکتالی متعلق به لندفرم‌های تثبیت شده است. با مقایسه ابعاد فرکتالی لندفرم‌های تثبیت‌شده در دو سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ می‌توان دریافت که این بعد تغییر چندانی نداشته است علت آن تثبیت شدن این لندفرم‌ها به دلیل تاغ‌کاری‌های شدید این منطقه بوده است. به عبارتی دیگر، تغییراتی در مساحت و وسعت این محدوده طی این مدت صورت نگرفته و بعد فرکتال نیز تغییری نداشته است. این مطلب با مقایسه لندفرم‌ها در دو سال در جدول ۱ تأیید شده است.

جدول ۳. مؤلفه‌های فرکتالی لندفرم‌های بادی اردستان

| مؤلفه‌های بررسی شده | برخان   |        | تپه‌ماسه‌ای |         | تپه‌ماسه‌ای موازی |         | لندفرم‌های تثبیت شده |         |
|---------------------|---------|--------|-------------|---------|-------------------|---------|----------------------|---------|
|                     | ۲۰۰۸    | ۲۰۱۵   | ۲۰۰۸        | ۲۰۱۵    | ۲۰۰۸              | ۲۰۱۵    | ۲۰۰۸                 | ۲۰۱۵    |
| a                   | ۰,۹۹۸۹۷ | ۰,۹۹۸۵ | ۰,۹۹۶۴۹     | ۰,۹۹۵۷۳ | ۰,۹۹۸۱۲           | ۰,۹۹۵۶۲ | ۰,۹۹۹۳۴              | ۰,۹۹۹۴۲ |
| c                   | ۰,۰۰۰۸۴ | ۰,۰۰۱۱ | ۰,۰۰۲۸۲     | ۰,۰۰۳۳۷ | ۰,۰۰۱۶۹           | ۰,۰۰۳۷۱ | ۰,۰۰۵۴               | ۰,۰۰۰۴۸ |
| R                   | ۰,۹۹۹۹۸ | ۰,۹۹۹۷ | ۰,۹۹۹۹۲     | ۰,۹۹۹۸۶ | ۰,۹۹۹۹۸           | ۰,۹۹۹۸۹ | ۰,۹۹۹۹۹              | ۰,۹۹۹۹۹ |
| d                   | ۱,۹۲۲   | ۱,۸۹۹  | ۱,۷۳۱       | ۱,۷۲۸   | ۱,۹۰۱             | ۱,۷۲    | ۱,۹۵۴                | ۱,۹۵۹   |

کمترین بعد فرکتال مربوط به تپه‌های ماسه‌ای طولی است. کم‌بودن این بعد به دلیل مساحت کم محدوده این لندفرم است. همچنین، این لندفرم نیز تغییر چندانی به لحاظ وسعت و مساحت طی مدت مورد مطالعه نداشته است. بیشترین تغییر بعد برای تپه‌های ماسه‌ای عرضی رخ داده است. وسعت این لندفرم طی این مدت بسیار کاهش یافته که همین کاهش مساحت موجب کاهش بعد فرکتالی لندفرم شده است.

برخان‌ها نیز با تغییر مساحت دچار تغییرات بعد شده است. بررسی روند تغییرات لندفرم‌های بادی به وسیله بعد فرکتالی نشان می‌دهد که تغییرات مساحت و حدود گسترش لندفرم‌ها با بعد فرکتالی آن‌ها کاملاً در ارتباط است و نظریه فرکتالی به خوبی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی را تجزیه و تحلیل می‌کند.

### بحث و نتیجه‌گیری

علمی مثل ژئومورفولوژی با متغیرهای ذاتی مرتبط است که خیلی دقیق قابل پیش‌بینی یا تکرار نیست و حساسیت زیادی به شرایط اولیه دارد. از آنجا که لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی دارای اشکال اندازه و ابعاد خاصی است، نحوه آرایش فضایی این اشکال نسبت به یکدیگر تعیین‌کننده بسیاری از فاکتورهای مؤثر و یکسان در شکل‌گیری آن‌هاست که با دقت می‌توان فاکتورهای مؤثر را شناسایی کرد. رفتار لندفرم‌ها در طبیعت، غیرخطی است و می‌توان آن را با روش‌های آماری تحلیل کرد. در این مطالعه مشاهده شد که ریاضیات ابزار قدرت‌مندی در اختیار ژئومورفولوژیست‌هاست تا به توصیف لندفرم‌ها و فرایندهای موجود در طبیعت بپردازند. با توجه به اینکه این لندفرم‌ها اندازه و ابعاد خاصی دارد، در قالب ریاضیات و آمار جای گرفت و در پی آن فاکتورهای مؤثر در تغییر ابعاد آن‌ها مطالعه شد. بدین صورت که هر چه وسعت آن‌ها بیشتر می‌شد، بعد فرکتال آن‌ها نیز بیشتر می‌شد و برعکس. در نتیجه، تغییرات بعد فرکتال تغییرات ابعاد لندفرم‌ها را به لحاظ مساحت نشان می‌دهد. در این پژوهش، نظریه فرکتالی در ژئومورفولوژی، به‌ویژه در مورد لندفرم‌ها به‌طور دقیق بررسی و تحلیل و استفاده شد و توانست با استفاده از نظریه‌ها و فرمول‌های خود پیچیدگی‌های موجود را در قالب ریاضیات بگنجانند و نتایج رضایت‌بخشی در اختیار ما قرار دهد.

در این مطالعه بعد فرکتالی لندفرم‌ها مطالعه شد. هر اندازه که بعد فرکتالی به دست آمده در دوره‌های مختلف

بررسی برای یک شکل با هم متفاوت باشد، نشان‌دهنده تغییرات به‌وقوع پیوسته در آن پدیده است، زیرا برخان‌های تثبیت‌شده با تاغ، طی چهار سال تغییر مساحتی نداشت و بعد فرکتال آن‌ها نیز ثابت بود. به‌علاوه، این مطالعه توانایی هندسه فراکتال را در شناسایی تغییرات اتفاق افتاده در لندفرم‌ها نشان داد.

تحلیل فراکتالی لندفرم‌های بادی نشان داد که الگوی هندسی لندفرم‌ها خاصیت فرکتالی دارد، بنابراین تغییرات الگوی هندسی آن‌ها را در سال‌های مختلف با هندسه فراکتال نشان می‌دهد. تحلیل بعد فراکتالی شاخص‌ترین مؤلفه برای تحلیل فراکتالی را نشان داد. بیشترین میزان بعد فرکتالی متعلق به لندفرم‌های بادی تثبیت‌شده است که بیشترین وسعت را در منطقه دارد. همچنین، عدم تغییرات این بعد طی مدت بررسی نشان‌دهنده تثبیت این لندفرم‌ها و عدم تغییر آن‌ها طی این مدت است. بیشترین میزان تغییرات مربوط به تپه‌های ماسه‌ای موازی است که گستره آن‌ها رو به کاهش است. این امر با کاهش بعد فرکتال نشان داده شد. به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده از تحلیل فراکتالی با واقعیت‌های مورفولوژیکی لندفرم‌های بادی منطبق بوده است.

به‌طور کلی، می‌توان ادعا کرد گسترش تحقیقات ژئومورفولوژی در این زمینه باعث کشف و شناسایی ابعاد جدیدی از توانایی هندسه فراکتال در مدل‌سازی و پیش‌بینی اشکال ژئومورفیکی خواهد شد. در جمع‌بندی کلی، نشان داده شد که دیدگاه فرکتالی با به‌کارگیری قواعد ساده تغییرات مقیاس به شبیه‌سازی رفتار پیچیده سیستم‌های ژئومورفولوژیکی می‌پردازد. با توجه به نظریه موضوع، رفتار لندفرم‌های بادی در دیدگاه فرکتالی جای گرفت و مطالعه شد.

## منابع

۱. جعفری، س. (۱۳۸۷). مثلث خیام، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر.
۲. دیویس، پ. (۱۳۹۳). بنیانی علمی برای جهان عقلانی، ترجمه محمد ابراهیم محبوب، انتشارات گمان.
۳. رامشت م.ح. (۱۳۸۲). نظریه کياس در ژئومورفولوژی، مجله جغرافیا و توسعه، ص ۱۳-۳۸.
۴. رامشت م.ح. و توانگر، م. (۱۳۸۱). مفهوم تعادل در دیدگاه فلسفی ژئومورفولوژی، مجله تحقیقات جغرافیایی، ۶۵-۶۶: ۷۹-۹۴.
۵. سایمون، ب. (۱۳۹۲). منظر الگو ادراک و فرایند، ترجمه بهناز امین‌زاده، انتشارات دانشگاه تهران.
۶. کرم، ا. (۱۳۸۹). نظریه آشوب، فرکتال (برخال) و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۸: ۶۷-۸۲.
۷. نثائی، و. (۱۳۸۹). مدیریت آشوب نظم در بی‌نظمی، کلک سیمین، تهران.
۸. نوری قیداری، م.ح. (۱۳۹۱). استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی از داده‌های روزانه بارش با استفاده از تئوری فرکتال، نشریه دانش آب و خاک، ۲۶(۳): ۷۱۸-۷۲۶.
۹. نیشابوری، م.ر.؛ احمدی، ع. و اسدی، ح. (۱۳۸۹). ارتباط بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات با برخی خصوصیات فیزیکی خاک، دانش آب و خاک، جلد ۲۰/۱(۴): ۷۳-۸۱.

10. Baas, A.C.W. (2002). Chaos, Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments, *Geomorphology*, 48: 309-328.

11. Bell, S. (2013). *Landscape pattern and process understanding*, translated by Aminzade B., University of Tehran.

12. Daviess, P. (2014). *Scientific basis for rational world*, translated by M. A. Mahjoob, Goman Publisher.
13. Deidda, R. (2000). Rainfall downscaling in Space<sup>o</sup> time multifractal framework, *Water Resource Research*, 36: 1779-1794.
14. Donald, L. Turcotte (2007). Self-organized complexity in geomorphology: observations and models, *Geomorphology*, 91: 302- 310.
15. Fonstad, M.A. and Marcus, M. (2003). Self-Organized Criticality in Riverbank Systems, *Annals of Association of American Geographers*, 93(2): 281-296.  
*New York: Springer-Verlag, 1989*
16. Frankhauser, P. (2004). *Comparing the morphology of urban patterns in Europe: a fractal approach*, *European Cities - Insights on outskirts*, A. Borsdorf and P. Zembri (Eds), Report COST Action 10 Urban Civil Engineering, Vol. 2 "Structures", Brussels, 79-105.
17. Huggett, R.J. (1988). Dissipative System: Implications for Geomorphology, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(1): 45-49.
18. Jafari, S. (2008). *Pascal's Triangle*, SID publication of Amirkabir university.
19. Karam, A. (2010). Chaos theory, fractal and non-linear system in geomorphology, *Research in Physical Geography Journal*, 8: 67- 82.
20. Kutlu, T.; Ersahin, S. and Yetgin, B. (2008). Relations between solid fractal dimension and some physical properties of soils formed over alluvial and colluvial deposits, *J Food Agri Environment*, 6: 445-449.
21. Lisi, B.; Honglin, H.; Zhanyu, W. and Feng, Sh (2012). Fractal properties of landforms in the Ordos Block and surrounding areas, China, *Geomorphology*, 04057: 1-12.
22. Malanson, G.P.; Butler, D.R. and Walsh, S.J. (1990). Chaos Theory in Physical Geography, *Physical Geography*, 11(4): pp. 293-304.
23. Nesaei, V. (2010). *The management of chaos (order in Irregularity)*, Kalak Simin, Tehran, Iran.
24. Neyshabouri M. Ahmadi A. Asadi H., 2010, Relation between fractal dimension of Particle size distribution with some physical properties of soil, *Knowledge of Soil and Water*, 1/20(4): 73-81.
25. Nori Gheydari, M.H. (2012). Extracted severity-frequency-term curves by using daily precipitation data by fractal theory, *Knowledge of Soil and Water Journal*, 26(3): 718- 726.
26. Papanicolaou, A.N. (Thanos); Achilleas, G.; Tsakiris, K. and Strom, B. (2012). The use of fractals to quantify the morphology of cluster microforms, *Geomorphology*, 139-140: 91- 108.
27. Pelletier, J.D. (2007). Qualitative Chaos in Geomorphic Systems, with an Example from Wetland Response to Sea Level Rise, *Journal of Geology*, 100(3): 365-374.
28. Pradip, KP. (2008). Geomorphological, Fractal dimension and b- value mapping in Northeast India, *J. Ind. Geophys. Union*, 12(1): 41- 54.
29. Ramesh, M.H. (2003). Chaos theory in geomorphology, *Journal of geography and development*, pp. 13- 38.
30. Ramesh, M.H. and Tavangar M. (2001). The concept of balance in geomorphology philosophical perspective, *Journal of Geographical Research*, 65-66: 79- 94.
31. Rodrigues-Iturbe, I. and Rinaldo, A. (1997). *Fractal River Basin (Chance and Self-Organization)*, Cambridge, Cambridge University Press.
32. Stevan, H. and Strogatz (1994). *Nonlinear dynamics and chaos (with applications to physics, Biology, chemistry, and engineering)*. Persuse books, Reading, Massachusetts, P 505.
33. Thomas, I.; Frankhauser, P. and Badariotti, D. (2007). Comparing the fractality of European urban districts: do national processes matter? Paper presented at ERSA meeting in Paris and at ECTQG meeting in Montreux.
34. Shen, X.H.; Zou, L.J.; Zhang, G.F.; Su, N.; Wu, W.Y. and Yang, S.F. (2015). Fractal characteristics of the main channel of Yellow River and its relation to regional tectonic evolution, *Geomorphology*, 127: 64- 70.
35. Zahouani, H.R.; Vargiolu, J. and Loubet, L. (1998). Fractal Models of Surface Topography and Contact Mechanics, *Mathl. Comput. Modelling*, 28(4-8): 517-534.